

Un modelo de optimización bi-objetivo para la selección de tecnología y asignación de donantes en la cadena de suministro de sangre

A bi-objective optimization model for technology selection and donor's assignment in the blood supply chain

Andrés Felipe Osorio Muriel, M.I.

afosorio@icesi.edu.co

Universidad Icesi Cali-Colombia

Sally Brailsford, Ph.D.

s.c.brailsford@soton.ac.uk

University of Southampton, United Kingdom

Honora Smith, Ph.D.

honora.smith@soton.ac.uk

University of Southampton, United Kingdom

.....
Fecha de recepción: Septiembre 9 de 2014

Fecha de aceptación: Septiembre 23 de 2014

Palabras clave

Cadena de suministro de sangre; optimización multi-objetivo; Épsilon restricciones; fraccionamiento de sangre; aféresis.

Keywords

Blood supply chain; multi-objective optimization, Epsilon constraint; blood fractionation; aphaeresis.

Colociencias **1**
tipo

Resumen

Los procesos de toma de decisiones suponen frecuentemente más de un objetivo. En el caso de la selección de tecnologías en procesos de captación de productos sanguíneos, están en conflicto los costos de recolección asociados a la tecnología utilizada y la cantidad de donantes requeridos para la satisfacción de la demanda. De igual forma, en la cadena de suministro de sangre este tipo de decisiones se tornan más complejas cuando se consideran las características propias del sistema, como proporcionalidad de tipos de sangre y compatibilidad entre productos. Para dar solución a este problema se propone un modelo de programación lineal entera que contiene como objetivos la minimización del costo total y del número de donantes. Este modelo está sujeto a restricciones de capacidad, proporcionalidad de tipos de sangre y satisfacción de demanda entre otras. Para la solución del modelo se utilizó Open Solver 2.1 y para la generación de las soluciones eficientes que conforman el frente de Pareto se implementó en VBA el algoritmo épsilon restricciones aumentado.

Abstract

Decision-making processes often contain more than one objective. In technology selection in the blood collection processes, the cost related to the collection technology and the amount of donors required to meet the demand are in conflict. In the same way, in the blood supply chains decisions become more complex when features of the system such as blood type proportions and compatibilities are considered. In order to generate solutions to this problem, an Integer Linear Programming is proposed considering total cost minimisation and amount of donors required. This model also considers distinct constraints such as capacity, proportionality, and demand fulfilment among others. Open Solver 2.1 was used to solve this problem in combination with Visual Basic for Applications for generating the set of efficient solutions that make up the Pareto front through the augmented Epsilon constraint algorithm.

I. Introducción

Los bancos de sangre son instituciones encargadas de captar, fraccionar y distribuir productos sanguíneos, para satisfacer la demanda proveniente de tratamientos clínicos y emergencias. Sin embargo, la creciente demanda por este tipo de productos y la escasez de donantes hacen de la toma de decisiones en este sistema un proceso complicado (Seifried et al., 2011). Por otra parte restricciones de tiempo de vida útil, compatibilidad y proporciones de tipo de sangre, hacen que algunas técnicas de investigación de operaciones, tales como la de optimización, que han sido comúnmente usadas en cadenas de suministro industriales, hayan sido poco aplicadas en este sistema.

El estudio de la cadena de suministro de sangre se ha centrado principalmente en la determinación de políticas óptimas de inventarios, ejemplos de esto puede ser encontrados en Cohen (1976), Nahmias y Pierskalla (1976), Pierskalla y Roach (1972), Chazan & Gal (1977), y Jagannathan y Sen (1991). Sin embargo, la complejidad de este problema ha hecho que se prefieran métodos como el de simulación, que no aportan soluciones óptimas, pero que permiten estudiar las características del sistema y evaluar el impacto de políticas propuestas, ejemplo de esto puede ser encontrado en los trabajos de Ryttilä y Spens (2006), Baesler, Martínez, Yaksic, y Herrera (2011), Baesler, Nemeth, Martínez, y Bastías (2013), y Simonetti, Forshee, Anderson, y Walderhaug. (2013).

La literatura relacionada a la recolección y producción en temas de sangre es poca y deja por fuera aspectos importantes como los que se incluyen en este artículo. El primer artículo en esta área fue propuesto por Cumming, Kendall, Pegels, Seagle, y Shubsda (1976), quienes desarrollaron modelos de pronóstico para mejorar las metas recolección, evitando sobrecosectar sangre. Por otra parte, Melnyk, Pagell, Jorae, y Sharpe (1995) presentaron una clasificación de donantes utilizando análisis de supervivencia mientras Glynn et al., (2003) y Sonmezoglu et al., (2005), evaluaron indicadores de calidad en la captación de sangre durante desastres. Por su parte, Boppana y Chalasani (2007), desarrollaron cadenas de Markov para determinar tasas óptimas de recolección durante emergencias.

Recientemente, Lowalekar y Ravichandran (2010) desarrollaron un modelo de simulación para evaluar diferentes políticas de recolección, y Alfonso, Xie, Augusto, y Garraud (2012; 2013), un modelo de simulación para la estimación de la capacidad y el personal requerido. Finalmente, Madden, Murphy, y Custer (2007) compararon el uso de procesos de colección de glóbulos rojos por aféresis con respecto al fraccionamiento usual.

Sin embargo, existen múltiples temas que han sido poco estudiados en la etapa de recolección, ejemplo de esto es la programación de donantes, la asignación de donantes a los procesos de recolección, la eficiencia de los procesos de recolección y las metas

de recolección. Este trabajo pretende abordar un modelo de decisión donde, dada una demanda anual, se seleccione óptimamente los tipos de tecnología a utilizar. De igual forma el modelo incluye variables de asignación de los donantes a los procesos. Esta decisión toma complejidad cuando existen procesos llamados aféresis que están orientados a la extracción de varias unidades de un solo componente sanguíneo, en lugar de recolección de sangre total.

Este tipo de proceso tiene ventajas en términos de la eficiencia de la recolección, sin embargo, es considerablemente más costoso, lo que lleva a los administradores de los bancos de sangre a preguntarse cuál es la mejor forma de llevar a cabo los procesos teniendo en cuenta la optimización de los costos y la eficiencia en el uso de un recurso escaso, los donantes.

En la Tabla 1 se presenta la información detallada de los procesos de recolección y fraccionamiento más comunes y la cantidad de cada producto obtenido cuando se asigna un donante a este proceso.

El análisis de este tipo de decisiones debe considerar características propias de los productos, en las Tablas 2,3 y 4 se presentan las compatibilidades de los productos sanguíneos. Esto implica que la demanda de un producto puede ser suplida con otro, si cumple las condiciones de compatibilidad.

Tabla 1. Cantidad de producto obtenido por cada proceso de captación

Proceso	RBC	PL	PCM	PCA	CRIO
Triple bag	1	1			
Cuádruple bag – Alternativa A	1	1	1		
Cuádruple bag – Alternativa B	1				1
Glóbulos rojos por aféresis	2				
Plaquetas por aféresis				10	

Tabla 2. Compatibilidad de glóbulos rojos

	Paciente							
	O-	O+	A-	A+	B-	B+	AB-	AB+
O-	x	x	x	x	x	x	x	x
O+		x		x		x		x
A-			x	x			x	x
A+				x				x
B-					x	x	x	x
B+						x		x
AB-							x	x
AB+								x

Tabla 3. Compatibilidad de plaquetas

Donante	Paciente	
	Rh-	Rh+
	Rh-	x
Rh+		x

Tabla 4. Compatibilidad de crio precipitado and plasma

Donante	Grupo sanguíneo	Paciente			
		O	A	B	AB
	O	x			
	A	x	x		
	B	x		x	
	AB	x	x	x	x

Datos de estudio

Para la ejecución del modelo propuesto se utilizan datos de prueba tomando como base la información publicada en diferentes fuentes públicas, a continuación se describe en detalle la forma de preparación y las fuentes de los datos utilizados.

Demanda

La demanda empleada en la ejecución del modelo se estimó a partir de los datos de componentes transfundidos presentados por el Instituto Nacional de Salud [INS] (2012). Los valores de transfusiones de productos fueron multiplicados por las diferentes proporciones de tipos de sangre teniendo en cuenta las características de los diferentes tipos ABO y factores Rh de cada producto de acuerdo con lo publicado por Beltran, Ayala, y Jara (1999).

Costos

En este modelo se incluyen costos variables de producción y costos fijos de adquisición de tecnología. Existen costos adicionales, como es el caso de los equipos de refrigeración o los activos fijos, que no son considerados en este modelo, dado que no dependen de la tecnología a utilizar. Para la estimación de costos variables se calculó un estimado de acuerdo con la cantidad y el tipo de productos, y su valor en pesos colombianos presentado en el Decreto 2423 de 1996. De igual forma, el valor de los costos fijos asociados con la compra de equipos se obtuvo de los precios comerciales de los equipos.

Descartes

En el cálculo de los parámetros de descarte se tienen en cuenta los datos de componentes producidos y componentes descartados presentados por el INS (2012). Para la estimación de este parámetro se excluyeron las causas que tienen que ver con la gestión misma de los bancos de sangre, es decir, se descontaron las cantidades

correspondientes a las causas: vencidas, almacenamiento y conservación inadecuada, separación inadecuada y sin capacidad de almacenamiento.

II. Modelo matemático

Modelo de programación lineal entera

Definición de Conjuntos

A = Conjunto de tipos de sangre.

B = Conjunto de tipos de procesos

C = Conjunto de tipos de producto

D = Conjunto de tipos de tecnologías (Fraccionamiento, plaquetas por aféresis y glóbulos rojos por aféresis)

Parámetros

CA_{ijk} = Cantidad de producto tipo j obtenido por la asignación del proceso de recolección k a un donante con sangre tipo i . [Unidades]

COP_{ik} = Costo de recolección cuando se asigna un donante tipo i al proceso k [\\$]

CF_e = Costo fijo de compra de una unidad de equipo de tecnología e . [\\$]

CAP_e = Capacidad de procesamiento de una unidad de equipo de tecnología tipo e . [Min]

CR_{ke} = Cantidad de tiempo de recurso tipo e requerido para procesar un donante por el proceso tipo k [Min]

D_l = Demanda del producto l . [Unidades]

CO_{jl} = 1 si el producto j es compatible con el producto l , 0 lo contrario.

DON_i = Proporción de la sangre tipo i en la población donde se realiza el análisis.

$DESC_j$ = Tasa histórica de descarte del producto j

Variables

X_{ik} = Cantidad de donantes con sangre tipo I asignados al proceso k

Y_{jl} = Cantidad de producto tipo j utilizado para abastecer demanda del producto l .

N_e = Cantidad de equipos de tecnología tipo e requeridos

Objetivo 1.

El modelo se ejecuta independientemente bajo dos objetivos de estudio. La primera función objetivo estudiada corresponde a la minimización de donantes requeridos para la atención de la demanda

Min W = Costo variable + costo fijo

$$Min W = \sum_{i \in A} \sum_{k \in B} COP_{ik} * X_{ik} + \sum_{e \in D} N_e * P_e \quad (1)$$

Objetivo 2

En el segundo caso, la función objetivo representa el costo total de producción para el horizonte planeación. El costo de producción hace referencia al costo de efectuar un proceso determinado. Dentro de este costo están implícitos todos los costos de materiales; sin embargo, este costo no incluye las inversiones en equipo necesarias, para llevar a cabo el proceso.

Min W = Donantes requeridos

$$\text{Min } W = \sum_{i \in A} \sum_{k \in B} X_{ik} \quad (2)$$

Restricciones

Satisfacción de demanda

$$\sum_{j \in C} Y_{jl} * CO_{jl} \geq D_l * (1 + DESC_l); \forall l \in C \quad (3)$$

En esta restricción se plantea el cumplimiento total de la demanda de los diferentes productos. En el lado izquierdo se presenta la variable de decisión Y_{jl} , que define el uso de un tipo de producto para la atención de la demanda de uno diferente, y se garantiza su factibilidad a través de su multiplicación por el parámetro binario CO_{jl} , que define la compatibilidad. De igual forma, en el lado derecho se hace un incremento de la demanda basado en la lógica de que existe cierta tasa de descarte de los productos, es decir, un porcentaje de la cantidad obtenida que no es apto para la transfusión a los pacientes.

Disponibilidad de producto

$$\sum_{l \in C} Y_{jl} \leq \sum_{i \in A} \sum_{k \in B} (X_{ik} * CA_{ijk}); \forall j \in C \quad (4)$$

En el caso anterior se utiliza la variable Y_{jl} para hacer el abastecimiento. En esta nueva restricción, se garantiza que el producto a utilizar se encuentra disponible. Cabe notar que en el lado derecho, la variable de decisión X_{ik} multiplicada por el parámetro CA_{ijk} representa la cantidad producida, lo que garantiza que los productos que se usen para la atención de demanda deberán ser menores a los disponibles.

Proporcionalidad de tipos de sangre

$$\sum_{k \in B} X_{ik} \leq \sum_{i^* \in A} \sum_{k \in B} X_{i^*k} * DON_i; \forall i \in A \quad (5)$$

Esta restricción plantea que la cantidad de donantes por cada tipo de sangre a asignar por el modelo no puede ser mayor a la cantidad de donantes totales por la proporción de cada tipo de sangre. En otras palabras, esta restricción permite que los resultados del modelo conserven las diferentes proporciones por tipo de sangre. Esta restricción

es importante, ya que de no existir, los resultados del modelo indicarían que se debe conseguir una cantidad muy alta de determinados tipos de sangre, que son escasos en la sociedad, como por ejemplo el O-, que es el donante universal, para el caso de los glóbulos rojos.

Capacidad

$$\sum_i \sum_k X_{ik} * CR_{k\epsilon} \leq CAP_{\epsilon} * P_{\epsilon}; \forall \epsilon \in D \quad (6)$$

Esta restricción garantiza que el uso de los recursos por los procesos de producción no excede la capacidad escogida. Cabe notar que en el lado derecho la capacidad no es fija, sino que está asociada a la variable P_{ϵ} , que está asociada a la cantidad de equipos de cada tecnología a utilizar.

Proporcionalidad de donantes de glóbulos rojos por aféresis

$$X_{i5} \leq \sum_k X_{ik} * PROP; \forall i \in A \quad (7)$$

Esta restricción plantea que la cantidad de donantes por cada tipo de sangre a asignar por el modelo no puede ser mayor a la cantidad de donantes totales por la proporción de cada tipo de sangre. En otras palabras, esta restricción permite que los resultados del modelo conserven las diferentes proporciones por tipo de sangre. Esta restricción es importante, ya que de no existir, los resultados del modelo indicarían que se debe conseguir una cantidad muy alta de determinados tipos de sangre que son escasos en la sociedad (como por ejemplo el O-).

Consistencia

$$Y_{jl} \leq CO_{jl} * M; \forall j,l \in C \quad (8)$$

Esta última restricción se introduce con el objetivo de garantizar que la variable Y_{jl} será cero siempre que no exista compatibilidad entre los productos j y l . En este caso M es un número grande que permite tomar valores positivos a Y_{jl} en el caso de que exista compatibilidad.

$$X_{ik}, Y_{jl}, P_{\epsilon} \geq 0 \text{ y Enteras} \quad (9)$$

III. Estrategia de solución

El modelo propuesto fue configurado en hojas de cálculo y resuelto a través de Open Solver 2.1 que utiliza el *solver* CBC del proyecto COIN-OR. Dado que la restricción de proporcionalidad de donantes es una restricción que complica el modelo –haciendo excesivo el tiempo de solución– y que en el algoritmo propuesto se requiere la solución de una gran cantidad de modelos, se evaluaron dos estrategias para agilizar el tiempo de solución con resultados aceptables. La primera consiste en la relajación y el ajuste

de algunas variables, en tanto que la segunda propende la relajación de la restricción por medio de multiplicadores de Lagrange. Se evaluaron las alternativas considerando la factibilidad del problema versus la *optimalidad* y se optó por la primera estrategia.

Todos los algoritmos, incluyendo los que se exponen más adelante, fueron codificados a través de Visual Basic for Applications [VBA], el cual se integra fácilmente con el *solver* propuesto. La ejecución de los modelos y de los algoritmos se llevó a cabo en un computador portátil con procesador i5 a 2.7 GHz y 4 GB de memoria RAM.

Optimización bi-objetivo

En general, un problema de optimización con k objetivos puede formularse de la siguiente forma

Encuentre:

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$$

De tal forma que se minimice

$$F(x) = [F_1(x), F_2(x), \dots, F_k(x)]$$

Sujeto a:

$$g_j(x) \leq 0, \forall j = 1, 2, \dots, m$$

En este tipo de problemas los objetivos se encuentran en conflicto, lo cual implica que el mejoramiento en alguno de los objetivos puede significar el deterioro en los demás. En el caso de la aplicación del modelo propuesto se tiene lo siguiente: el valor de la función objetivo, cuando se minimiza el costo, es de US\$22.418 millones, correspondiente a 165.708 donantes. Por otra parte, cuando se minimiza el número de donantes requeridos, el valor de la solución es 137.370, número que corresponde a un costo total de US\$27.855 millones. En este caso, se evidencia una clara competencia entre los objetivos, es decir, si se considera un menor costo, se requiere un mayor número de donantes, y viceversa. Por esto se hace necesario encontrar las soluciones óptimas teniendo en cuenta ambos objetivos.

Metodología de solución

Existen múltiples técnicas de optimización multi-objetivo, Marler y Arora (2004) hacen una revisión de las principales, así como sus aplicaciones en ingeniería. La técnica de solución depende de varios factores, como la complejidad del problema, el tiempo disponible y el nivel de exactitud requerido en la solución. En este caso, el problema, reducido a un solo objetivo, puede resolverse en un tiempo corto –a través de software de optimización–, lo que permite utilizar técnicas para buscar el conjunto de soluciones eficientes. En optimización multiobjetivo no existe una solución única, sino que se habla de un conjunto de soluciones que conforman el frente de Pareto. La ventaja de la obtención del frente es que permite al tomador de decisiones tener un panorama más amplio que la obtención de una única solución, a través de otras técnicas

como pesos ponderados o programación por metas, que finalmente dependen de los parámetros asignados

Una de las metodologías más antiguas en la solución de problemas multiobjetivo fue propuesta por Haimes, Lasdon, y Wismer (1975), se trata de ϵ - restricciones. Esta técnica, básicamente, consiste en convertir un modelo multi-objetivo en mono-objetivo, escogiendo una función objetivo como principal y configurando las demás como restricciones, asociadas a un conjunto de parámetros llamados ϵ , determinados especialmente para cada función objetivo presentada como restricción. La formulación general del método es la siguiente:

Encuentre:

$$x \in E^n$$

De tal forma que se minimice

$$F_s(x)$$

Sujeto a:

$$F_i(x) \leq \epsilon_i, \quad \forall i = 1, 2, \dots, k; i \neq s$$

$$g_j(x) \leq 0, \quad \forall j = 1, 2, \dots, m$$

La aplicación de esta versión de la metodología genera algunos inconvenientes, como la generación de soluciones óptimas débiles, es decir, soluciones óptimas para un valor de ϵ , pero que son dominadas por otras soluciones; otra falencia es que dado que se ejecutan ciertos valores de ϵ , pueden quedar restricciones óptimas por fuera del conjunto de soluciones generadas. Para dar solución a esto se han propuesto algunas mejoras a la metodología como puede verse en los trabajos de Mavrotas (2009), y Ehrgott y Ruzika (2005). En este artículo se utiliza la versión de ϵ restricciones aumentado propuesta Ehrgott y Ruzika (2005).

La formulación del problema ϵ restricciones aumentado es la siguiente:

Encuentre:

$$x \in E^n$$

De tal forma que se minimice

$$F_1(x) - \epsilon * \sum_{i=2}^k S_i/r_i ;$$

Sujeto a:

$$F_i(x) + S_i = \epsilon_i, \quad \forall i = 2, \dots, k$$

$$g_j(x) \leq 0, \quad \forall j = 1, 2, \dots, m$$

En este caso, las restricciones correspondientes a las funciones objetivo se hacen igual al parámetro ϵ añadiendo variables de exceso. Estas variables de exceso son premiadas en la función objetivo, con el parámetro ϵ_{ps} , que contiene valores muy bajos para no distorsionar las soluciones. Esto permite que el solucionador optimice la función objetivo principal y que, en menor medida, optimice las demás funciones objetivo para los parámetros ϵ de la ejecución. En la función objetivo, las variables de exceso S_i están divididas sobre un parámetro r_i , este parámetro corresponde al rango de variación del objetivo i , lo que se hace con el fin de normalizar los diferentes objetivos.

IV. Resultados

Resultados computacionales

La solución del problema se hizo de acuerdo con Ehrgott y Ruzika (2005), quienes establecen los límites de acuerdo con una solución lexicográfica de los objetivos. En el caso del modelo presentado, se optimiza la función objetivo de donantes y se configura la función objetivo costo como restricción. Esta configuración permite al tomador de decisiones encontrar los compromisos entre costo y número de donantes y, dado un presupuesto, encontrar la mejor configuración de equipos que minimiza el número de donantes requerido. Los resultados de la ejecución del modelo se presentan en la Tabla 5.

En la Figura 1 se presenta el frente de Pareto generado a partir de la configuración 2.

Las soluciones presentadas en el frente de Pareto sirven como base al tomador de decisiones en la selección de una configuración en particular. Este tipo de soluciones representan un criterio, sin embargo, en el momento de tomar la decisión, se deben considerar otros criterios cualitativos, tales como la capacitación del personal, el comportamiento de los donantes frente a los diferentes métodos, y los objetivos de la organización, entre otros.

Una vez seleccionado un presupuesto, el modelo arroja información valiosa contenida en las variables de decisión. A continuación se presenta un ejemplo en detalle de la solución obtenida para un presupuesto de US\$25 millones.

Tabla 5. Resultados de ejecución

	Configuración		
	1	2	3
Variación ϵ	0.05	0.01	0.001
Cantidad de modelos ejecutados	109	544	5437
Soluciones optimas encontradas	106	513	3573
Tiempo de ejecución (min)	1.06	5.28	52.83

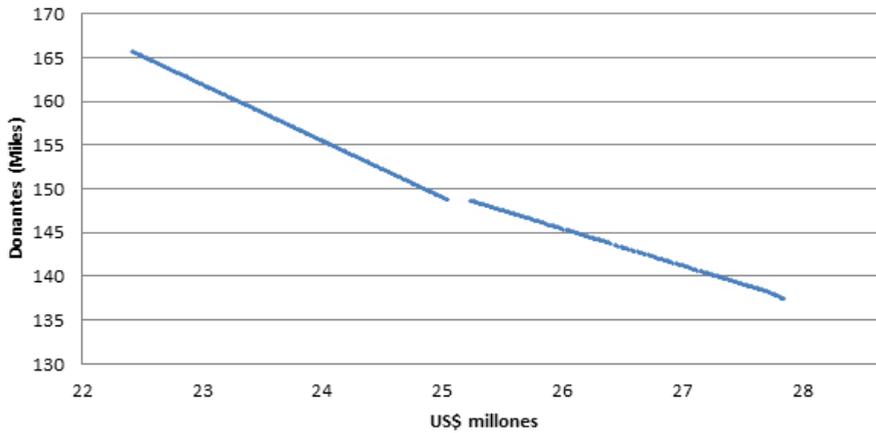


Figura 1. Frente de Pareto para la configuración 2 (Costo total vs No. de donantes)

Tabla 6. Asignación de donantes a los procesos

Proceso	A -	A+	AB -	AB +	B -	B +	O -	O +	Total
Triple bag	0	0	0	1.116	0	0	0	0	1.116
Cuádruple bag – Alternativa A	4.025	29.408	0	427	1.044	9.086	5.019	65.215	114.224
Cuádruple bag – Alternativa B	0	4.909	463	649	0	552	28	10.438	17.039
Glóbulos rojos por aféresis	0	4.600	0	0	0	1.214	2.585	8.277	16.676
Plaquetas por aféresis	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total donantes	4.025	38.917	463	2.192	1.044	10.852	7.632	83.930	149.055

Tabla 7. Asignación de glóbulos rojos

	Receptor								
	O-	O+	A-	A+	B-	B+	AB-	AB+	
Donante	O-	8.485	1.105	456	0	118	0	52	0
	O+		92.205		0		0		0
	A-			4.019	0			0	0
	A+				43.267				249
	B-					1.042	0	0	0
	B+						12.064		0
	AB-							462	0
	AB+								2.188

Tabla 8. Asignación de plaquetas

		Paciente	
		Rh-	Rh+
Donante	Rh-	10.086	0
	Rh+	104.133	

Tabla 9. Asignación de crioprecipitado

		Paciente			
		O	A	B	AB
Donante	Grupo sanguíneo O	10.465			
	A	0	4.909		
	B	0		552	
	AB	0	0	808	303

Tabla 10. Asignación de plasma

		Paciente			
		O	A	B	AB
Donante	Grupo sanguíneo O	69.989			
	A	8.439	24.886		
	B	3.205		6.894	
	AB	0	0	0	1.538

V. Futuras investigaciones

El modelo propuesto tiene múltiples extensiones que apuntan a diferentes áreas. Por un lado, puede ampliarse, incluyendo en él, decisiones de compra y venta de productos sanguíneos a otras entidades. De igual forma, el modelo puede estudiarse bajo parámetros estocásticos de demanda y donantes, lo que implica la inclusión de la incertidumbre en el proceso de toma de decisiones. Asimismo, pueden incluirse procesos adicionales, como plasma por aféresis y transfusión de sangre total, como también subproductos derivados, como es el caso de glóbulos rojos para neonatos, e irradiados, entre otros.

Finalmente, la aplicación de diferentes técnicas de optimización multi-objetivo y programación entera puede mejorar los resultados obtenidos. Sin embargo, en este tipo de decisiones siempre es necesario preguntarse si vale la pena el esfuerzo de implementación, con respecto a lo que el tomador de decisiones considera aceptable.

Conclusiones

El sector salud ha estado principalmente administrado por personal perteneciente a dicho sector, lo que implica que muchas de las metodologías exitosas para la toma de decisiones de otras áreas del conocimiento, no han sido aún aplicadas a este sector. La cadena de suministro de sangre ha recibido cuidado de investigadores y académicos en toma de decisiones, principalmente en el área de inventarios; sin embargo, hay otras áreas, como recolección y producción, que han sido relativamente poco exploradas.

La toma de decisiones en general, típicamente tiene más de un objetivo a mejorar. En este caso, se evidencio un claro conflicto entre dos objetivos que comprometen recursos importantes y escasos como son el dinero y los donantes, y se desarrolló una metodología que permite soportar el proceso de toma de decisiones en la selección de tecnologías de recolección y asignación de donantes a partir de la aplicación de una técnica relativamente sencilla.

Las ventajas de la aplicación del método ϵ -Restricciones radican en la facilidad de su aplicación y en la capacidad de la técnica para encontrar soluciones que pertenecen al conjunto óptimo de Pareto. Si bien la técnica es incierta, en términos de que no se sabe si ha encontrado todas las soluciones, por lo menos es cierto que las soluciones que encuentra son óptimas, y se puede garantizar que pertenecen a la frontera eficiente. La exactitud del proceso de búsqueda depende del tomador de decisiones en la asignación de los incrementos en el parámetro ϵ .

En este caso el modelo fue resuelto utilizando un *solver* libre, hojas de cálculo y VBA, recursos que se encuentran disponibles prácticamente en cualquier equipo, lo que hace más fácil la aplicación de este tipo de metodologías en las organizaciones, al no depender de software costoso. *ST*

Referencias bibliográficas

- Alfonso, E., Xie, X.L., Augusto, V., Garraud, O. (2012). Modeling and simulation of blood collection systems. *Health Care Management Science*, 15(1), 63-78.
- Alfonso, E., Xie, X.L., Augusto, V., Garraud, O. (2013). Modelling and simulation of blood collection systems: Improvement of human resources allocation for better cost-effectiveness and reduction of candidate donor abandonment. *Vox Sanguinis*, 104(3), 225-233.
- Baesler, F., Martínez, C., Yaksic, E., & Herrera, C. (2011). Logistic and production process in a regional blood center: modeling and analysis. *Revista Medica de Chile*, 139(9), 1150-1156.
- Baesler, F., Nemeth, M., Martínez, C., & Bastías, A. (2013). Analysis of inventory strategies for blood components in a

- regional blood center using process simulation. *Transfusion*, 54(2), 323-330.
- Beltran, M., Ayala, M., & Jara, J. (1999). Frecuencia de grupos sanguíneos y factor Rh en donantes de sangre, Colombia, 1996, *Biomédica*, 19(1), 39-44.
- Boppana, R.V. & Chalasani, S. Analytical models to determine desirable blood acquisition rates. In *2007 IEEE International Conference on System of Systems Engineering*, San Antonio, TX, 2007. Piscataway, NJ: IEEE.
- Chazan, D. & Gal, S. (1977). A Markovian model for a perishable product inventory. *Management Science*, 23(5), 512-521.
- Cohen, M.A. (1976). Analysis of single critical number ordering policies for perishable inventories. *Operations Research*, 24(4), 726-741.
- Cumming, P.D., Kendall, K.E., Pegels, C.C., Seagle, J.P., & Shubbsda, J.F. (1976). A collections planning model for regional blood suppliers: description and validation. *Management Science*, 22(9), 962-971.
- Decreto 2423 de 1996. (1997, enero 31). *Diario Oficial No. 42.961*. Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional
- Ehrgott, M. & Ruzika, S. (2005). *An improved Epsilon-Constraint method for multiobjective programming*. [on line]. Retrieved from <file:///C:/Users/Jos%C3%A9Ignacio/Downloads/nr96.pdf>
- Glynn, S.A., et al. (2003). Effect of a national disaster on blood supply and safety: The September 11 experience. *JAMA*, 289(17), 2246-2253.
- Haimes, Y., Lasdon, L. Wismer, D. (1971). On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-1(3), 296-297.
- Instituto Nacional de Salud [INS]. (2012). Informe nacional de indicadores. Bogotá, Colombia: INS.
- Jagannathan, R. & Sen, T. (1991). Storing crossmatched blood: a perishable inventory model with prior allocation. *Management Science*, 37(3), 251-266.
- Lowalekar, H. & Ravichandran, N. (2010). Model for blood collections management. *Transfusion*, 50(12-pt2), 2778-2784.
- Madden, E., Murphy, E.L., Custer, B. (2007). Modeling red cell procurement with both double-red-cell and whole-blood collection and the impact of European travel deferral on units available for transfusion. *Transfusion*, 47(11), 2025-2037.
- Marler, R.T. & Arora, J.S. (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26, 369-395.
- Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ϵ -constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 213(2), 455-465.
- Melnyk, S.A., Pagell, M., Jorae, G., & Sharpe, A.S. (1995). Applying survival analysis to operations management:

- Analyzing the differences in donor classes in the blood donation process. *Journal of Operations Management*, 13(4), 339-356.
- Nahmias, S. & Pierskalla, W.P. (1976). A two-product perishable/nonperishable inventory problem. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 30(3), 483-500.
- Pierskalla, W.P. & Roach, C.D. (1972). Optimal issuing policies for perishable inventory. *Management Science*, 18(11), 603-614.
- Rytilä, J.S. & Spens, K.M. (2006). Using simulation to increase efficiency in blood supply chains. *Management Research News*, 29(12), 801-819.
- Seifried, E., et al. (2011). How much blood is needed? *Vox Sanguinis*, 100(1), 10-21.
- Simonetti, A., Forshee, R.A., Anderson, S.A., & Walderhaug, M. (2013). A stock-and-flow simulation model of the US blood supply. *Transfusion* 54(3), 828-838.
- Sonmezoglu, M., et al. (2005). Effects of a major earthquake on blood donor types and infectious diseases marker rates. *Transfusion Medicine*, 15(2), 93-97.

Curriculum vitae

Andrés Felipe Osorio Muriel

M.I. Ingeniero Industrial con Especialización en Logística y Maestría en Ingeniería Industrial de la Universidad del Valle (Cali, Colombia); es profesor de tiempo completo del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad Icesi. Actualmente adelanta estudios de doctorado en la *Universidad de Southampton* (Reino Unido). Sus áreas de interés profesional son la investigación de operaciones y la optimización de cadenas de suministro.

Sally Brailsford

Matemática del *King's College* de la Universidad de Londres, con Maestría en Investigación de Operaciones y Doctorado en Matemáticas, de la Universidad de Southampton (Reino Unido). Fue Decana Asociada (Investigación & Emprendimiento) para la Facultad de Negocios y Leyes (2010-2013) y Vicepresidente de la *UK Operational Research Society*. Actualmente preside el *EURO Working Group on OR Applied to Health Services* [ORAHHS] y es profesora de *Management Sciences* en la *University of Southampton*.

Honora Smith

Maestra en Investigación operativa, Matemáticas y Ciencias Administrativas en *Southampton Management School*. Forma parte del cluster de investigación en *Healthcare en LANCS Initiative*. Luego de su primer grado en *Cambridge University*, (una combinación de Matemáticas y Administración), trabajó en los campos de Investigación de Operaciones y Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, ganando experiencia en la industria manufacturera, la planeación de transporte, el Servicio Nacional de Salud y la industria farmacéutica. Obtuvo una Maestría y un Doctorado en Investigación de Operaciones, en *University of Southampton*.